

Однако вектор $\frac{\partial \vec{r}_p}{\partial S_1}$ есть единичный касательный вектор к линии Γ_1 в точке касания M . Следовательно, этот вектор находится в плоскости линии Γ_1 , которая перпендикулярна вектору \vec{k}_p . Стало быть, и вектор $\frac{\partial \vec{r}_p}{\partial S_1}$ также перпендикулярен вектору \vec{k}_p . Таким образом, должно быть $\vec{k}_p \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial S_1} = 0$, и тогда формула (7) принимает вид: $\left(\vec{r}_p \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial S_1} \right) \left(\vec{k}_p \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial z_p} \right) = 0$. Второй из этих сомножителей для зубчатых передач, передающих движение давлением поверхностей зубьев P_a и P_b , отличен от нуля. Стало быть, $\vec{r}_p \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial S_1} = 0$. Или иначе $\frac{\partial}{\partial S_1} \left(\frac{r_p^2}{2} \right) = 0$.

Равенство это может быть сформулировано экстремальной теоремой:

Из всех точек линии, получающихся от пересечения поверхности зуба плоскостью, точкой касания будет та, расстояние до которой от полюсной точки экстремально.

Следствие: В точке касания контактных линий их общая касательная перпендикулярна вектору, проведенному из полюсной точки в точку касания.

Выводы из данного исследования и перспективы последующих исследований в данном направлении. При разработке циклограммы зацепления для цилиндрических передач Новикова ДЛЗ с арочной формой зубьев необходима величина осевого смещения точек контакта, принадлежащих одному зубу, лежащих на разных контактных линиях. Экстремальная теорема позволяет обеспечить наличие этих точек контакта, а, следовательно, и плавность перекрытия.

Список литературы: 1. *Догода М.И.* Зубчатые передачи с круговой и циклоидальной линией зуба и технологические особенности их изготовления / М.И. Догода, В.Д. Тереник // Технология механосборочного производства. – Краматорск, 1975. – Вып.19. – С.55–59. 2. *Догода М.И.* Зубчатые передачи с эллиптической линией зуба и особенности их изготовления / М.И. Догода, В.Д. Тереник, О.П. Гоголев // Технология механосборочного производства. – Краматорск, 1979. – Вып.5. – С.55. 3. *Айрапетов Э.Л.* О выборе продольной кривизны арочных зубьев / Э.Л. Айрапетов, С.Э. Айрапетов, Т.Н. Мельникова // Цилиндрические передачи с арочными зубьями: Тез. докл. зонального семинара. – Курган, 1983. – С.11. 4. *Паулиньш К.К.* Квазиэвольвентное зацепление в арочных цилиндрических передачах // Исследование и повышение качества поверхностей и эксплуатационных свойств материалов и изделий. – Рига, 1983. – С.45–56. 5. *Догода М.И.* Оптимизация геометрических параметров арочных передач с зацеплением Новикова // Перспективные направления создания новых конструкций тяжело нагруженных редукторов и прогрессивная тех-

нология их изготовления: Тез. докл. науч. – техн. конф. – Краматорск, 1987. – С.145. 6. *Wu X., Song X., Liu H.* A New method in curvature calculation of the conjugate gear surfaces in 3-d meshing. Mathematical theory and applications // Vol. 23. №3, 2003. – p.49–52. 7. *Кириченко А.Ф., Матюшенко Н.В.* К вопросу о преобразовании геометрии зацепления Новикова с арочной формой зубьев к виду, удобному для анализа // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2007. – Вип. 21. – С.166–170.

Поступила в редколлегию 15.05.08

УДК 539.3

Н.Н. ТКАЧУК, аспирант, НТУ „ХПИ”

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛНОГО ЦИКЛА ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕТАЛЕЙ СО СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

Пропонуються теорія, методи, алгоритми і моделі для аналізу напружено-деформованого стану деталей, що мають складнопрофільні поверхні, та для синтезу їх геометрії. На прикладі двохпараметричних циліндро-конічних передач продемонстровано весь комплекс досліджень – від початку проектно-дослідницьких робіт до виготовлення дослідного зразка та його випробування.

A theory, methods, algorithms and models are offered for analysis of stressed and deformed state of details which have geometrically-complex surfaces, and for synthesis of their geometry. The whole complex of researches – from the beginning of design-research works to making of pre-production model and his test – is shown on the example of two-parametrical cylinder-conical transmissions.

Введение. Одной из основных тенденций современного машиностроения является рост числа деталей, форма рабочих поверхностей которых определяется условиями подвижного контакта с сопряженными поверхностями других деталей. Яркими примерами таких деталей являются элементы пространственных и плоских кулачков, зубчатых передач, радиальных гидроредукторов, механизмов наклона электроплавильных печей, шарико- и роликоподшипников. При этом при их проектировании, выборе материалов и условий обработки и эксплуатации возникает связанная задача синтеза геометрии рабочих поверхностей и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) тел, находящихся в контакте. Особенно сложной такая задача становится при исследовании сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями, которые не имеют аналитического описания, а получаются как облако точек при численном решении вспомогательной задачи о кинематическом контакте сопряженных поверхностей. Методы решения таких задач и модели для синтеза геометрии и анализа НДС предложены ранее и описаны в работах [1-4].

В то же время задача анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза геометрии не является изолированной, а встраивается в общую цепь проектно-исследовательских работ по технологической подготовке производства деталей с кинематически генерируемыми поверхностями. Соответственно на разрабатываемые методы, алгоритмы и модели накладываются дополнительные ограничения, обуславливаемые необходимостью свободного двунаправленного бесконфликтного обмена данными между этапами жизненного цикла исследуемых объектов (рис. 1).

Особую актуальность задача комплексного моделирования сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями приобретает в случае, когда некоторые из этапов 1-8 (см. рис. 1) наряду с этапами собственно разработки математических моделей, синтеза геометрии и анализа напряженно-деформированного состояния (1-3, см. рис. 1) на момент исследований не реализованы. В данной работе на примере исследования двухпараметрических цилиндро-конических передач проиллюстрированы этапы комплексного решения всех задач моделирования. Именно разработка сквозной технологии моделирования сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями, а также ее практическая реализация составляет цель работы.

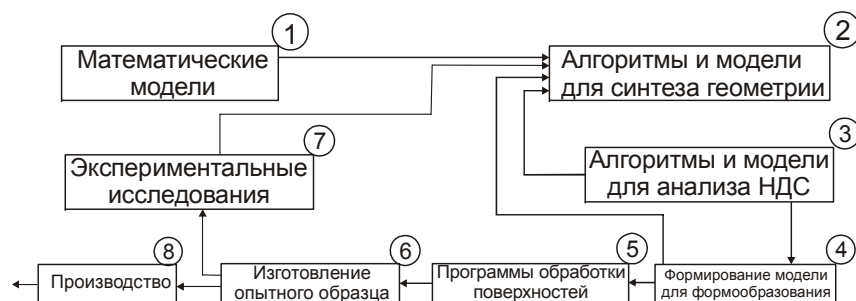


Рис. 1. Жизненный цикл создания сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями

Постановка задачи. В статьях [1-4] описаны общие подходы к решению задач анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза геометрии сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями. Совокупность приведенных методов, алгоритмов и моделей покрывает основную проблемную часть (1-3) этапов из приведенных на рис. 1. В то же время оставшиеся этапы 4-8 в этой ситуации представляют большую часть проблемы. Однако особое значение эти этапы приобретают для объектов, которые не изготавливались или изготавливались в единичных экземплярах. Так, двухпараметрическая передача [5-7] была изготовлена в небольшом количестве (опытные образцы), технология изготовления отра-

ботана только для частных случаев, а программно-модельные средства для обработки сложнопрофильных рабочих поверхностей зубьев не созданы. В связи с этим в данной работе основное внимание уделяется этапам 4-7 (см. рис. 1) для опытного образца цилиндро-конической зубчатой передачи [1,5].

Естественно, что не имея в распоряжении отработанной технологии изготовления сложнопрофильных рабочих поверхностей зубьев двухпараметрической передачи, в первую очередь следует ориентироваться на универсальные методы, модели и технологии обработки поверхностей. В этой связи изначально и технология восстановления геометрической формы 2, и алгоритмы анализа напряженно-деформированного состояния 3 ориентированы на дальнейшее использование на этапе 4 формирования модели для формообразования поверхности 4 (причем на основе технологии объемного фрезерования с применением современных технологий и фрезерных станков с ЧПУ) (см. рис. 1). На завершающем этапе становится возможным экспериментальное исследование изготовленного опытного образца (см. этапы 6, 7 на рис. 1).

Запланированный комплекс исследований, записанных выше, невозможен без этапа изготовления опытного образца. Для этого требуется изначальная ориентация средств, методов и моделей геометрического описания, в том числе и на этот ответственный этап. Основная сложность реализации этого вида моделирования состоит в том, что по исследуемым объектам заранее необходимо предусмотреть формат представления данных, который обеспечивает, в конечном счете, воспроизведение поверхности рабочих зубьев в виде, удобном для формирования программ обработки на станках с ЧПУ.

Методы решения поставленных задач. При реализации методов и алгоритмов, соответствующих этапам 1-3 (см. рис. 1), используются общие соотношения параметрического описания элементов сложных механических систем, метода конечных элементов, 3D геометрического параметрического моделирования. Реализация предложенных методов производится в среде Delphi, Pro/ENGINEER, ANSYS путем параметризации основных соотношений кинематического метода синтеза сопряженных поверхностей [8], метода конечных элементов [9], методов конструктивной геометрии [10] в моделях, представленных в формате соответствующих программ и макросов. Соответственно, нужно обеспечить преемственность при переходе от данных форматов описания к форматам обработки поверхностей на станках с ЧПУ. Для этого предлагается получаемую геометрическую модель поверхности описать в формате системы Pro/ENGINEER, чтобы в модуле Pro/NC без конфликтов произвести генерацию обрабатывающей программы (в данном случае – лицевой и тыльной стороны зубьев цилиндрической передачи). Имея в распоряжении управляющую программу для станка с ЧПУ, можно изготовить физическую модель изделия, а затем провести испытания

на выполнение условий обкатывания, а также по критерию соответствия реального контактного давления вычисленному при решении соответствующей задачи анализа.

Реализация предложенной методики. В качестве исходного примера цилиндро-конического зацепления выступает таковое при значениях параметров, приведенных в таблице. При этом заданной является бочкообразная форма поверхностей зубьев цилиндрического колеса с эвольвентной образующей [1] (рис. 2).

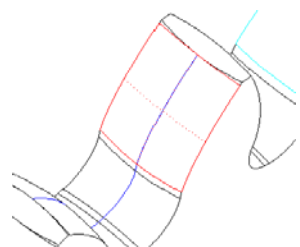


Рис. 2. Геометрия зубьев цилиндрического колеса

Таблица.

Параметры колес	
$z_1 = 20$	количество зубьев конического и цилиндрического колес
$z_2 = 15$	
$\varepsilon = \pi/2$	угол конусности
$\beta = \pi/3$	начальный угол наклона линий зубьев конического колеса
$R_1 = 140$ мм	внешний радиус цилиндрического колеса
$r_1 = 70$ мм	внутренний радиус конического колеса
$R_2 = 52,5$ мм	радиусы начальной и основной окружностей цилиндрического колеса
$R_2^{ev} = 70$ мм	
$r_2^c = 25$ мм	радиус кривизны поверхности зуба цилиндрического колеса в поперечном направлении
$m = 7$ мм	модуль эвольвентного профиля цилиндрического колеса

Соответствующая рабочая поверхность зубьев конического колеса получается в виде облака точек, сопряженных семейству точек цилиндрического (рис. 3).

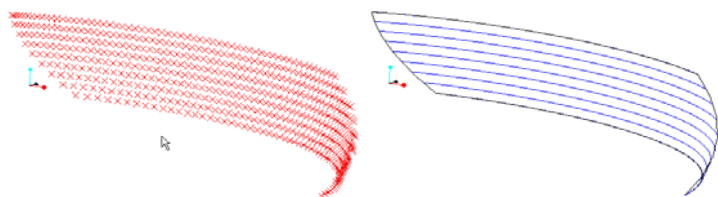


Рис. 3. Облако точек и рабочие поверхности зубьев конического колеса

Дополняя рабочие части поверхностей переходными торцевыми и боковыми участками поверхностей, можно получить 3D модели цилиндрического и конического зубчатых колес (рис. 4).

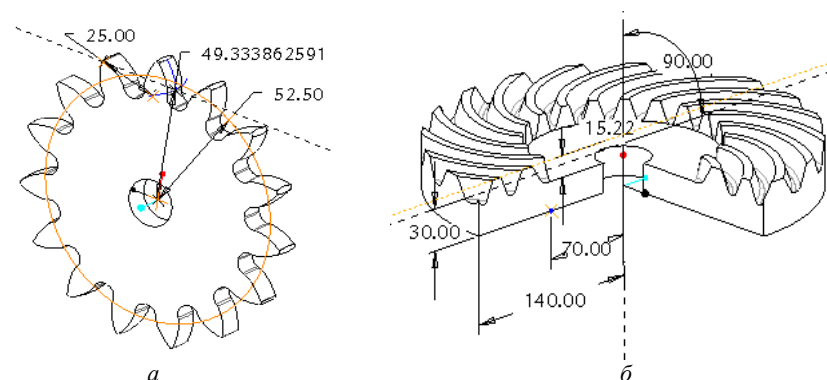


Рис. 4. Геометрические модели цилиндрического (а) и конического (б) колес

Тогда можно проверить собираемость и сопрягаемость этих колес визуально, а также путем вычисления интерференции зубьев. Следующим этапом создания физической модели двухпараметрической передачи является ее физическое изготовление. Для этих целей программа обработки на станке с ЧПУ, сгенерированная на основе 3D геометрической модели, обрабатывалась на плексигласовом материале (рис. 5).

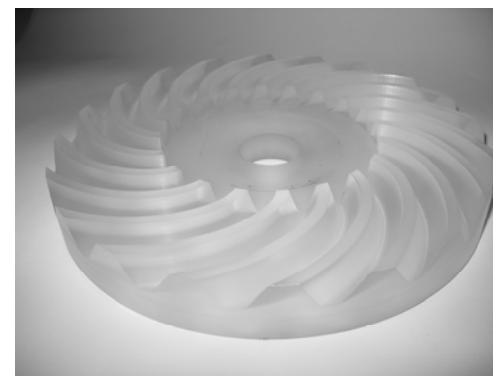


Рис. 5. Прототип плоского конического колеса, изготовленный на станке с ЧПУ

В результате получались колеса, образующие зацепление. Для их базирования, фиксации и обеспечения согласованного изменения взаимного положения предлагается механизм, представленный на рис. 6. Он был изготовлен из стали 20Х. В результате собран макет зубчатой передачи (рис. 7), реализующей два вида относительного движения звеньев: согласованное вращение с заданным передаточным отношением и взаимное смещение цилиндрического и конического колес.

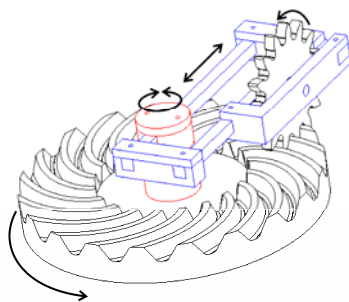


Рис. 6. Механизм позиционирования колес прототипа передачи

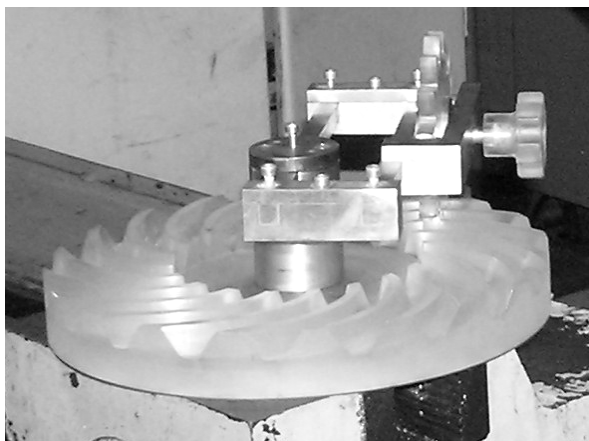


Рис. 7. Макет плоской цилиндро-конической передачи

Используя изготовленный опытный экземпляр, можно проверить работоспособность передачи, точность и стабильность ее передаточного отношения, а также прочность зубьев, определяемую уровнем контактных давлений. Для этого передача в сборе опробывается при различных конфигурациях взаимного положения зубчатых колес. В результате проверки установлена работоспособность спроектированной передачи, а также проведена оценка контактных зон при различных смещениях цилиндрического колеса вдоль образующей конического.

Заключение. В результате комплексного моделирования двухпараметрического цилиндро-конического зацепления установлено следующее:

1. Рабочие поверхности зубьев синтезированного двухпараметрического зацепления находятся в непрерывном зацеплении при одновременном совершении двух видов движения – вращении вокруг своих осей и взаимном смещении колес с сохранением заданной ориентации оси цилиндрического колеса относительно линии зуба конического колеса.

2. Реализована схема сквозной передачи данных между различными этапами моделирования сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями, обладающая свойствами бесконфликтности, согласованности, параметричности и ассоциативности.

3. Впервые осуществлен полный цикл исследований элементов сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями на примере двухпараметрической передачи (вплоть до этапа производства изделий), обладающий всем комплексом свойств, необходимых для его автоматизации и встраивания в процесс проектирования в условиях реального производства.

В результате продемонстрирована адекватность предложенных методов, достоверность и точность построенных моделей и полученных результатов исследований сложнопрофильных тел с кинематически генерируемыми поверхностями на примере двухпараметрических передач.

Список литературы: 1. Ткачук Н.Н. Особенности реализации кинематического метода расчета двухпараметрических передач // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 3. – С.133–151. 2. Ткачук Н.Н. Оценка контактных напряжений в сопряжении сложнопрофильных деталей // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – Вып. 24. – С.138–152. 3. Ткачук М.М. Віртуальне прототипування механізмів з кінематично генерованими поверхнями // Машинознавство. – 2007. – №6(109). – С.26–32. 4. Ткачук Н.Н. К вопросу конечноэлементного моделирования колес двухпараметрических передач // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 2. – С.159–166. 5. Ковалюх В.Р. Синтез зубчатых передач на основе колес с равновысокоширокими зубьями и впадинами: Дисс. канд.техн. наук // Харьков, 1982. – 156с. 6. Ковалюх В.Р. Двухпараметрические колеса с равновысокоширокими зубьями и впадинами // Машиноведение. – 1982. – №1 – С.43–45. 7. А.с. СССР №1128025, МКИ⁴ F16H3/42. Способ передачи вращения в цилиндрикоконической зубчатой передаче и цилиндрикоконическая зубчатая передача 8. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – Л.: 1968. – 584с. 9. Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. – М: Мир, 1989. – 190с. 10. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560с.

Поступила в редколлегию 15.05.08